

文章编号: 1001-1455(2007)04-0358-06

改进的霍普金森压杆技术在聚氨酯泡沫塑料 动态力学性能研究中的应用*

姜锡权^{1,2}, 陶 洁¹, 王玉志¹

(1. 炮兵学院, 安徽 合肥 230031;

2. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026)

摘要: 用改进的霍普金森杆技术得到了聚氨酯泡沫塑料在动态应力均匀和恒应变率条件下的实验结果。

关键词: 固体力学; 动态力学性能; 霍普金森压杆; 泡沫塑料; 动态应力均匀; 脉冲整形器; 恒应变率

中图分类号: O344.1

国标学科代码: 130 · 1515

文献标志码: A

1 引 言

自 1949 年 H. Kolsky 发明分离式霍普金森压杆(split Hopkinson pressure bar, SHPB)以来,它已被普遍认为是测试多种材料,例如金属、陶瓷、岩石、混凝土、复合材料、聚合物和泡沫材料等在高应变率下力学响应的一种行之有效的实验手段。分离式霍普金森压杆技术可以获得材料在 $10^2 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$ 应变率范围内的应力应变曲线。为了获得有效的、精确的实验资料,几十年来学者们比较充分地研究和讨论了霍普金森压杆实验中存在的许多问题,不少问题已经得到解决或基本解决。如试件的尺寸效应、波在杆中的二维弥散修正等。然而,在实验过程中试件是否处于应力均匀状态以及试件是否以恒应变率变形这 2 个问题上所给予的关注还不多,或者说还没有找到一个非常可行的方法来解决这两个问题。在霍普金森压杆实验试件中保持应力均匀性是霍普金森压杆技术的重要假设之一,周风华等^[1]于 1992 年讨论了高聚物试件在霍普金森压杆实验中早期应力不均匀性的影响,他们的一维特征线数值模拟结果表明,SHPB 实验用于研究高聚物粘弹性时,试件内部存在一定程度的应力不均匀性。如果在实验中试件内的应力在很长一段时间内不能达到均匀状态,所得到的应力应变曲线的有效性将值得商榷,所以在试验中保持试件中良好的应力均匀性是取得正确实验结果的关键。同时,在试验中保持试件恒应变率变形则是取得更加精确的应力应变曲线的关键。尤其对于应变率敏感材料更是如此。对某些材料,特别是软材料和脆性材料而言,如果这 2 个条件不能满足,将会导致实验结果的明显误差。因此,为得到有效的、精确的实验数据,必须对常规霍普金森压杆技术作仔细的修正以满足这 2 个条件。

脉冲整形技术能较好地修正常规霍普金森压杆技术以保证试件以近似恒应变率变形和试件中的应力均匀性。

泡沫材料因其具有特殊的吸能能力被广泛应用于民用和军用领域。但要提高其应用效率就离不开对其力学性能的深入了解。许多学者为了其特殊的用途对于泡沫材料的应力应变关系和其他一些力学性能作了较深入的研究^[2]。因泡沫材料材料常用于动载情况下,因此对其动态力学性能的研究就更显得重要。不少学者用不同的实验手段研究了其动态压缩性能。在众多的动态实验技术中,霍普金森压杆技术被认为是可在某一恒定应变率下获得其整个加载段应力应变曲线的唯一技术^[3]。泡沫材料因其具有特殊的低强度、大应变、低波速等性质,难以用常规的(传统的)分离式霍普金森压杆准确地研究其动态力学性能。因为试件材料的波速低,用常规的方法,难以使试件在实验过程中满足

* 收稿日期: 2006-02-20; 修回日期: 2006-05-05

作者简介: 姜锡权(1958—),男,博士,副教授。

动态应力均匀条件。由于试件材料的低强度,低波速使试件与杆之间的波阻抗严重失配,透射信号极小,以致难以测量。在本文中,讨论用改进的霍普金森杆装置研究泡沫材料动态力学性能方面的工作。

2 在霍普金森杆上对泡沫塑料进行动态压缩实验时的特殊问题

2.1 动态应力均匀

在霍普金森压杆实验的数据处理过程基本都采用了一维应力和试件中动态应力、应变均匀的假设。

动态应力均匀过程的长短与试件材料中的波速、试件厚度、加载脉冲的形状、试件与杆之间的阻抗匹配有关。试件材料中的波速是材料的固有性质,无法在实验中改进。阻抗失配越严重,越易实现动态应力均匀^[4],但同时也带来透射信号极弱等一些问题。试件的厚度是影响动态应力均匀的一个重要因素。1949年,H. Kolsky^[5]就指出厚的试件将影响动态应力均匀。后来,不少学者都做过这方面的研究,从动态应力均匀和二维效应等方面的因素考虑,对试件提出了合适的长细比。但是,要数据处理公式^[4]得到满足,要么试件的物理厚度为0,要么试件中的应力均匀。而试件的物理厚度不可能为0,W. Chen等^[6]指出,对于泡沫这样的软材料,不可能通过减小试件厚度来保证动态应力均匀,必须从入射波的形状着手来解决这个问题。而入射波的形状可以通过脉冲整形器来调整。

2.2 微弱透射信号

由于泡沫材料试件与杆之间严重的阻抗失配,导致透射波信号极小以致于用常规的电阻应变片难以检测透射波信号,而仅用入射波和反射波信号会导致难以接受的误差。为了增加透射信号的幅值,一些学者采用高信噪比的粘弹性材料作透射杆,但是由于其试件与透射杆之间波阻抗较为匹配,增加了达到动态应力均匀的时间^[4]。另外,粘弹性材料的非线性,以及其性质对于温度、水分、时间的依赖性也导致了实验数据分析的复杂性。为了解决这个问题,可采用铝管作为透射杆并且用半导体应变片代替常用的电阻应变片,半导体应变片的敏感系数约为电阻应变片的70倍(137.7/2.09)。

2.3 恒应变率

动态力学实验目的之一是研究应变率对材料本构的影响,或者说是研究某一确定应变率下材料的本构关系。在动态应力均匀条件下,根据处理公式,应变率的幅值与反射波应变信号的幅值成正比。但是利用常规的霍普金森杆技术难以得到在某一恒定应变率(即反射波的幅值恒定)下的实验结果。

图1是某陶瓷材料在常规霍普金森压杆实验中的典型波形。由图可见,在试件破坏前反射波一直在上升,没有平台。这说明应变率一直在上升。不能说明试件在什么应变率下变形和破坏。利用脉冲整形技术调整入射波的波形,可以得到一个平整的反射波,因而可以保证试件在恒应变率下变形。

2.4 低应变率和大应变

相对而言,对泡沫材料作高应变率实验较容易,但做低应变率、大应变实验较难。因为子弹速度有个下限。泡沫材料在被压实之前要经历一个大变形阶段。要准确完整描述其动态力学性能就必须得到包括这个大变形阶段的动态应力应变曲线。在低应变率下要产生大应变就必须加长入射脉冲的长度。利用脉冲整形技术可以大幅度降低入射波的幅值(降低应变率),加长入射脉冲的长度,进而实现低应变率下的大变形。

3 实验

3.1 材料和试件

材料:美国太平洋研究实验室(Pacific Research Laboratories, Vashon, WA, USA)的聚氨酯硬质泡沫塑料。其泡为封闭结构,其密度为 $0.24 \times t/m^3$,其超声波速为 1.2 km/s 。

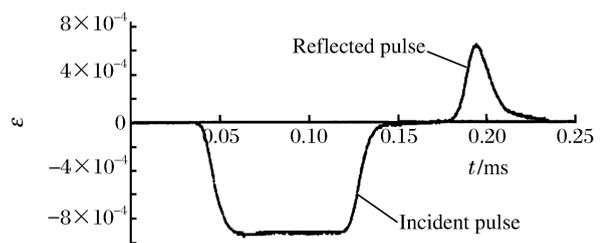


图1 某陶瓷材料在常规霍普金森压杆实验中的典型波形
Fig. 1 A typical waveform from the experiment on a ceramic specimen with SHPB

试件为圆柱形,尺寸为 $\varnothing 12.2\text{ mm}\times 3.3\text{ mm}$ 。这样既利于动态应力均匀,又使试件能基本代表整体材料特性。

3.2 实验装置

准静态实验:MTS810。

动态实验:改进的霍普金森压杆系统,其结构草图如图 2,其中大部分与常规的霍普金森压杆系统相同。杆材料为 7075-T651 铝合金,入射杆长为 2 134 mm,透射杆长为 765 mm,直径 19.05 mm。与常规的霍普金森压杆相比:增加了脉冲整形器、石英晶体力传感器。脉冲整形器为紫铜圆片或圆管,其具体尺寸据试件材料和所需达到的应变率而定。2 只石英晶体力传感器置于试件 2 端以考查试件中的动态应力均匀情况。另外为更精确的采集透射信号,将透射杆上的电阻应变片换为半导体应变片。主要记录放大仪器有 Tektronix TDS 420A 数位波形存贮仪、ADA400A 微分放大器。

3.3 准静态实验

准静态实验在 MTS810 上进行。其所用试件与动态实验试件完全相同。2 个应变率分别为 9×10^{-5} , 9×10^{-3} ,应变率由 MTS 的位移控制模式决定。

3.4 动态实验

3.4.1 脉冲整形器的设计

脉冲整形技术的基本思想是,通过延长入射脉冲的上升时间和调整入射脉冲加载部分的形状来使试件材料尽快达到应力均匀以及实现恒应变率变形。因此,能否满足以上 2 个条件,一方面取决于入射脉冲的大小和形状,另一方面也取决于被测材料力学行为。对不同的被测材料,要满足以上 2 个条件,就要有与之相对应入射脉冲。脉冲整形器的任务就是将入射脉冲调整为所需要的大小和形状。因而,脉冲整形器的设计与被测材料有关。被测材料不同,脉冲整形器的材料、形状和尺寸等不同,并没有固定不变的标准。采用最简单的脉冲整形器将大大提高实验效率和可重复性。紫铜就是很好的脉冲整形器材料之一,它能够满足大多数材料实验要求。根据需要可采用不同尺寸的片和管。

具体作脉冲整形器设计时,要根据希望达到的应变率、应变和被测材料的性能仔细设计脉冲整形器。图 3、4 是对所研究材料在较低应变率、较低应变率情况下所做的 1 组实验波形。其中 1 通道为入射波和反射波,2 通道为透射波,3、4 通道为试件前后 2 个端面上压力。子弹直径 19.05 mm,长度 190.5 mm。子弹距枪口 25.4 mm,气体压力 0.13 MPa。

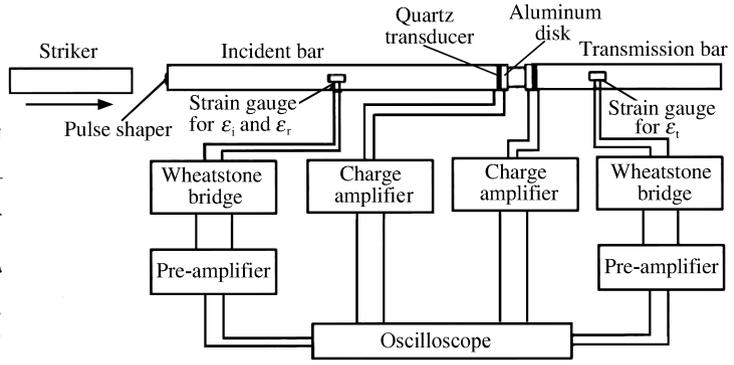


图 2 改进的霍普金森压杆系统草图
Fig. 2 The sketch of the modified SHPB

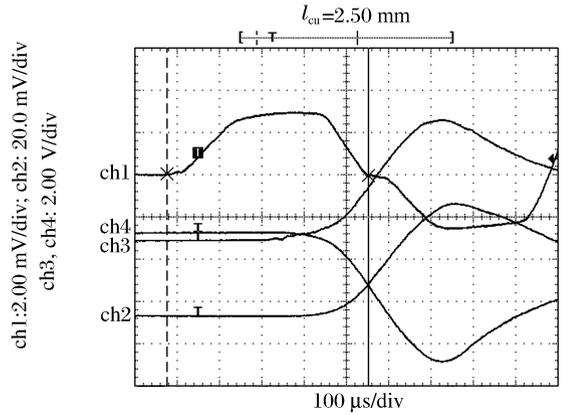


图 3 波形图
Fig. 3 The waveform

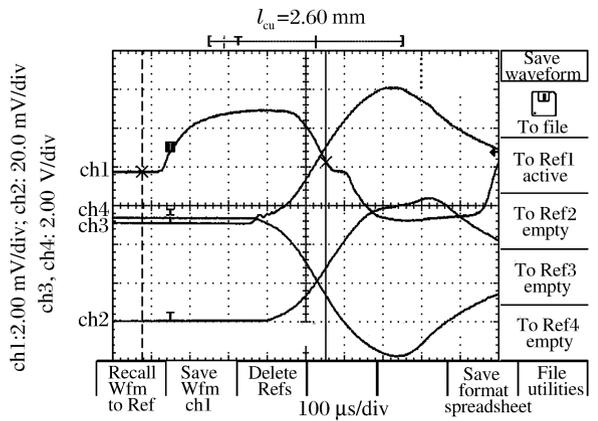


图 4 波形图
Fig. 4 The waveform

采用外径 3.14 mm, 内径 1.25 mm 的小紫铜管作为脉冲整形器。小紫铜管长度分别为 2.50 (图 3)、2.60 mm (图 4)。由图可以看出, 不同长度的紫铜管, 对入射波形的整形效果是不同的。紫铜管长度的微小改变引起了反射波形的明显变化。图 4 反射波形就比图 3 反射波形更为平和宽, 更好地实现了恒应变率。

图 5 和图 6 是对所研究材料在较高应变率、较低应变情况下所做的 1 组实验波形。各通道所录的信号内容同图 3、4。子弹直径 19.05 mm, 长度也为 190.5 mm。子弹距枪口 50.8 mm, 气体压力 0.172 MPa。采用外径 4.78 mm, 内径 2.20 mm 的较大直径的紫铜管作为脉冲整形器。他们的长度分别为 3.60 mm (图 5)、3.27 mm (图 6)。由图可以看出, 图 6 (紫铜管长 3.27 mm) 的反射波形最平整。

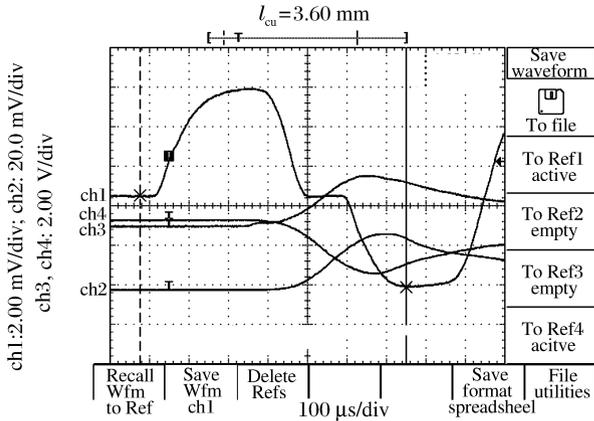


图 5 波形图

Fig. 5 The waveform

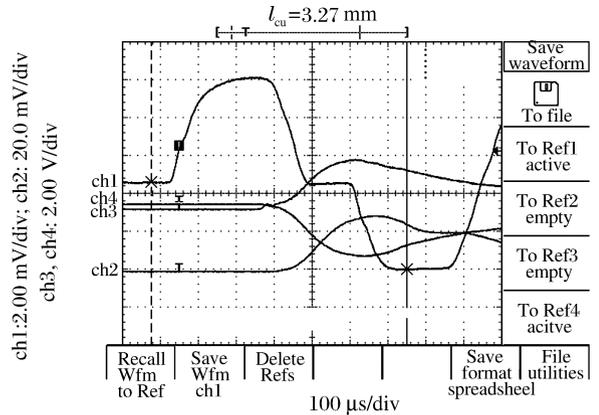


图 6 波形图

Fig. 6 The waveform

3.4.2 动态实验的实施

动态实验分别在 4 个应变率下进行, 这 4 个应变率分别为 240、450、2 250 和 4 100 s⁻¹。

图 7 是在 4 100 s⁻¹ 应变率下的实验波形, 图 8 是由放置在试件两端的石英晶体力传感器测得的试件 2 端面上的力信号。

透射波信号由透射杆上半导体应变片获得。由图 7 可见, 透射信号具有很高的信噪比, 达到了预期要求。入射波信号是经过脉冲整形过的, 经过整形的入射波一方面使反射波保持基本水平, 另一方面也利于试件中的动态应力均匀。由图 8 可见, 在 60~170 μs, 试件中的动态应力保持均匀, 这个期间实验数据的处理结果是可靠有效的。在大约 60 μs 之前, 试件前端面的力 (应力) 高于后端面的力 (应力)。这个过程属于动态应力均匀过程。

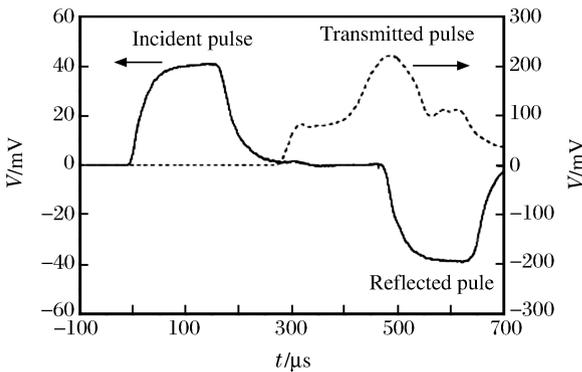


图 7 4 100 s⁻¹ 应变率下实验波形

Fig. 7 Waveform at strain rate 4 100 s⁻¹

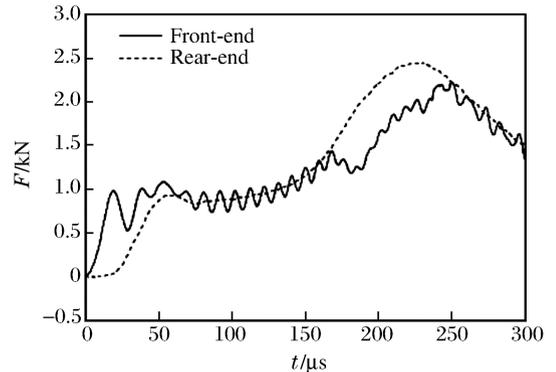


图 8 试件前后端面力信号

Fig. 8 Force signals on the front and rear surfaces of a specimen

3.5 实验结果

图9是试验材料在不同应变率下的工程应力应变曲线。准静态下有2个不同应变率,动态下有4个应变率。

我们注意到由于动态应力均匀需要时间,动态情况下的应力-应变曲线的起始部分是不精确的,例如在 $4\ 100\ \text{s}^{-1}$ 应变率下,12%应变之前的数据是不精确的。将动态曲线与静态曲线相比较,会发现静态曲线上没有应力峰。

当应变在5%之下时,泡沫材料表现为线弹性行为。动态情况下,当应变在5%~10%,它主要表现为非线性行为。约10%时达到应力峰。10%~15%是不稳定阶段。15%之后基本是恒应力平台,直到大约30%。超过30%之后,应力随应变单调增加。应力应变曲线上的这些特征都与试件材料变形的物理过程相关。线弹性阶段与细胞壁的弹性弯曲相关,平台段与细胞的坍塌相联系。而单调上升段则与相对的细胞壁被压至相互接触相关。

由曲线看出,当应变率达到超过 $2\ 000\ \text{s}^{-1}$ 时,材料的应变率效应不明显。在450和 $240\ \text{s}^{-1}$ 应变率下,材料的应变较小。这是因为在低应变率下要得到大的应变必须加长加载脉冲。但由于受到杆长的限制,载入脉冲长度不能过长,否则,反射波将与入射波重迭。

4 结论

(1) 在改进后的霍普金森压杆系统上能较好地完成对泡沫材料的动态力学性能试验。采用脉冲整形技术有利于试件的动态应力均匀,基本实现了试件在恒应变率下变形;置于试件前后2端面的石英晶体力传感器能监测试件中的动态应力均匀情况,明确提示在什么时间段中均匀性假设得以满足,实验数据是准确有效的。采用半导体应变片大大提高了透射信号的信噪比。

(2) 要满足动态应力均匀和恒应变率的要求,需要仔细设计脉冲整形器。它与所希望达到的应变、应变率有关,还与被测材料的动态力学性能有关。在其他条件不变的情况下,紫铜管长度的细微变化,都导致波形,特别是反射波形的明显变化。

(3) 低应变率、大应变仍然是对泡沫这样的软材料作动态实验的一个难题。脉冲整形器可以大大降低入射波的幅值以大大减小应变率,加长入射波的长度,但其长度受到了入射杆杆长的限制,以致目前还难以实验得到泡沫材料在 $200\ \text{s}^{-1}$ 左右应变率下大应变(30%)范围内的应力-应变曲线。

(4) 当应变率达到和超过 $2\ 000\ \text{s}^{-1}$ 时,材料的应变率效应不明显。当应变在5%之下时,聚氨基脂硬质泡沫材料表现为线弹性行为。动态情况下,当应变在5%~10%,它主要表现为非线性行为。约10%时达到应力峰。10%~15%是不稳定阶段。15%之后基本是恒应力平台,直到30%左右。超过30%之后,应力随应变单调增加,体现材料被进一步压实。

参考文献:

- [1] 周风华,王礼立,胡时胜.高聚物 SHPB 试验中试件早期应力不均匀性的影响[J].实验力学,1992,7(1):23-29.
ZHOU Feng-hua, WANG Li-li, HU Shi-sheng. On the effect of stress nonuniformness in polymer specimen of SHPB tests[J]. Journal of Experimental Mechanics, 1992, 7(1): 23-29.
- [2] Zhao H, Gary G. Behaviour characterization of polymeric foams over a large range of strain rates[J]. International Journal of Vehicle Design, 2002, 30: 135-145.
- [3] Chen W, Lu F, Winfree N A. A split Hopkinson bar technique for low impedance materials[J]. Experimental Me-

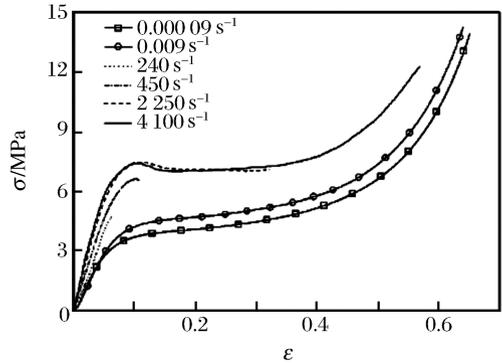


图9 试验材料在不同应变率下的工程应力应变曲线

Fig.9 The engineering stress vs. strain curves at different strain rates for test material

chanics, 2002, 39: 81-85.

- [4] 王礼立. 应力波基础[M]. 第二版. 北京:国防工业出版社, 2005:52-60.
- [5] Kolsky H. An investigation of mechanical properties of materials at very high rates of loading[J]. Proceedings of the Physical Society, 1949(B), 62: 676-700.
- [6] Chen W, Lu F, Frew D J, et al. Dynamic compression testing of soft materials[J]. Journal of Applied Mechanics, 2002(B), 69: 214-223.

Application of modified split Hopkinson pressure bar technique in the study of dynamic behavior of a polyurethane foam

JIANG Xi-quan^{1,2*}, TAO Jie², WANG Yu-zhi²

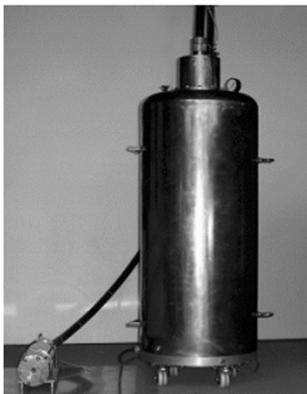
(1. Artillery Academy, Hefei 510632, Anhui, China;

2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China)

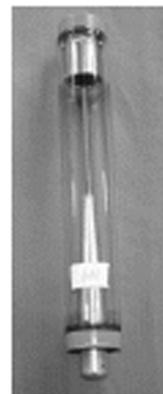
Abstract: The experimental technique of split Hopkinson pressure bar is an effective method to carry out an experiment in study of the dynamic behavior of materials. But some problems such as non-uniform dynamic stress in a specimen and non-constant strain rate during the experiment may arise if the technique isn't modified. Polyurethane foams have been widely used in civilian and military areas. It is more important to study their mechanical behavior, especially, dynamic behavior. The dynamic behaviors of a polyurethane foam under the conditions of uniform stress in the specimen and constant strain rate were detained experimentally with modified split Hopkinson pressure bar technique.

Key words: solid mechanics; dynamic behavior; SHPB; polyurethane foam; uniform dynamic stress; pulse shaper; constant strain rate

(接 357 页)



X-V 型 X 光机



X 光管

(转 379 页)

(中国工程物理研究院流体物理研究所提供)

* Corresponding author: JIANG Xi-quan
E-mail address: xiquanjiang@yahoo.com.cn
Telephone: 86-551-5768183